

教育部高职高专规划教材

挤压工艺及模具

翟德梅 主编

罗大金 主审



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分，改革开放以来，在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下，各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看，具有高职高专教育特色的教材极其匮乏，不少院校尚在借用本科或中专教材，教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此，1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》（以下简称《基本要求》）和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》（以下简称《培养规格》），通过推荐、招标及遴选，组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师，成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍，并在有关出版社的积极配合下，推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种，用5年左右时间完成。这500种教材中，专门课（专业基础课、专业理论与专业能力课）教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求，在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上，充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位，调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础，突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下，专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间，在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上，充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验，解决新形势下高职高专教育教材的有无问题；然后再用2~3年的时间，在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，通过研究、改革和建设，推出一大批教育部高职高专规划教材，从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材，并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作，不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

挤压技术作为一种高效、优质、低消耗的少/无切屑加工工艺，在金属材料的塑性加工中获得了迅速发展。目前在机械、轻工、汽车、航空航天及仪器仪表等行业的应用日益广泛，已经成为材料塑性加工技术中不可缺少的重要加工手段之一。它具有生产率高、制件质量好、材料利用率高等一系列优点，同时这项技术也具有理论性强、技术含量高等特点。如果没有较全面透彻地掌握这方面的知识，就很难胜任这项技术的设计工作，而有关挤压技术的资料和教材，目前在国内并不多见，为满足教学及这项技术发展的需要，我们总结近年来教学及科研的成果，并根据教育部最新制定的高职高专机械类专业人才培养目标，编写了此书。

全书共分十三章，主要对以下几个方面的问题进行了探讨和总结。

① 有关金属在挤压成形时的流动规律和变形过程中的应力应变，变形后的组织和性能及变形力的分析和计算方法。

② 挤压用材对挤压工艺的适用性，毛坯的制备，表面处理和润滑剂的选择。

③ 挤压零件的分类和挤压件图的设计，典型零件的挤压工序分析及其尺寸精度与表面质量分析。

④ 挤压模具的结构分析，模具工作零件的设计和受力分析及强度计算。挤压设备的介绍和一般选用方法。

⑤ 模具失效的原因和提高模具寿命的方法。

⑥ 特种挤压工艺，如温热挤压、型腔挤压、等温挤压和静压挤压等的基本原理、特点和一般设计方法及主要应用。

⑦ 挤压制件的质量分析和编制工艺规程的基本方法。

本书由翟德梅主编，赵华、原红玲、刘洁任副主编，王士学、翟洪凯任编委。本书由罗大金教授主审。各章编写的具体分工如下：概论、第八章由王士学编写，第一章、第十二章由原红玲编写，第二章、第四章由翟洪凯编写，第三章、第五章、第六章和第九章由翟德梅编写，第七章、第十一章由刘洁编写，第十章、第十三章由赵华编写。全书由翟德梅负责统稿。

在本书的编写过程中得到了河南机电高等专科学校等单位有关领导的大力支持以及黄利文教授、杨占尧教授的大力帮助，此外在编写过程中参考了有关兄弟院校的教材和著作，并得到了一拖集团等企业有关分厂的大力帮助，为本书提供了许多生产实践经验及资料，在此作者表示衷心的感谢。

本书可作为高职高专模具设计与制造和塑性成形工艺及设备专业教学用书，也可供从事挤压技术的工程技术人员使用。

由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2004年3月

内 容 提 要

挤压技术是一种发展迅速的高效、优质、低损耗的少/无切屑加工工艺，是材料塑性加工领域的一个重要分支。本书系统介绍了挤压工艺及模具的基本理论和基本设计方法，并列举了很多成功的实例，总结了作者多年来从事挤压技术的科研及教学工作经验。

全书共分十三章，主要内容包括：挤压的基本原理、挤压毛坯的制备、毛坯的表面处理及润滑、冷挤压力的计算、冷挤压工艺设计、冷挤压模具、挤压设备、温热挤压、模具型腔挤压、特种挤压工艺及模具、挤压件质量分析、模具失效与提高其使用寿命的途径、挤压工艺规程编制。每章均附有许多加工实例，便于读者熟悉挤压技术的全过程，既掌握一般的基本理论，又了解当前生产中实际问题的解决途径。

本书可作为高等学校模具设计与制造专业和塑性成形工艺及设备专业的教材，也可供相关专业的工程技术人员参考。

目 录

概论	1	第五节 承压垫板的设计	133
一、挤压基本类型	1	第六节 模具导向装置的设计	134
二、挤压技术的特点	2	第七章 挤压设备	136
三、挤压技术的发展	3	第一节 冷挤压变形力-行程曲线分析	136
第一章 挤压的基本原理	6	第二节 挤压工艺对设备的要求	136
第一节 挤压的变形过程	6	第三节 挤压设备的选用	139
第二节 挤压变形时的应力与应变	8	第四节 主要挤压机介绍	142
第三节 挤压时金属的流动	10	第八章 温热挤压	145
第四节 挤压变形后金属的组织 and 性能	16	第一节 挤压温度选择	145
第二章 毛坯的制备	20	第二节 温热挤压的润滑	149
第一节 挤压用材的选择	20	第三节 温热挤压的挤压力	152
第二节 毛坯的切割	21	第四节 温热挤压模具	157
第三节 冷挤压毛坯的软化处理	26	第五节 温热挤压件的尺寸精度和表面粗糙度	159
第三章 冷挤压毛坯的表面处理及润滑	31	第六节 温热挤压的加热方法	161
第一节 碳钢和低合金钢的磷化处理	31	第七节 温热挤压工艺实例	161
第二节 草酸盐处理	38	第九章 模具型腔挤压	170
第三节 钢毛坯的润滑	39	第一节 模具型腔挤压特点	170
第四节 有色金属的表面处理与润滑	41	第二节 挤压型腔的结构工艺性	173
第四章 冷挤压力的计算	45	第三节 型腔挤压压力的确定	175
第一节 冷挤压力的确定	45	第四节 型腔挤压用的坯件	179
第二节 影响单位挤压力的主要因素	46	第五节 型腔挤压时的润滑	183
第三节 冷挤压变形力的计算	53	第六节 型腔挤压的基准凸模	184
第四节 冷挤压变形力的测定	67	第七节 模具套圈的设计	187
第五章 冷挤压工艺设计	71	第八节 挤压型腔精度	189
第一节 挤压件图的设计	71	第九节 典型模具的型腔挤压	190
第二节 毛坯尺寸计算	77	第十章 特种挤压工艺及模具	195
第三节 许用变形程度	78	第一节 等温挤压	195
第四节 冷挤压件的尺寸精度及表面粗糙度	83	第二节 静压挤压	208
第五节 挤压零件分类	88	第三节 高速挤压	209
第六节 冷挤压变形工序设计	93	第十一章 挤压件质量分析	213
第七节 典型冷挤压件工艺介绍	103	第一节 挤压件的经济精度和表面粗糙度	213
第六章 冷挤压模具	110	第二节 挤压件表面常见缺陷和疵病	216
第一节 冷挤压模具结构分析	110	第三节 典型形状挤压件的质量分析	226
第二节 工作零件设计	114	第四节 主要金属材料挤压的质量分析	229
第三节 组合凹模的设计	125	第五节 冷挤压零件的力学性能	232
第四节 卸件和顶出装置的设计	131	第十二章 模具失效与提高模具使用	

寿命的途径	237
第一节 检查模具失效的方法	237
第二节 凸模的早期失效	238
第三节 凹模的早期失效	241
第四节 预应力圈的早期失效	242
第五节 模具垫板的早期失效	243
第六节 影响模具早期失效的原因	243

第七节 提高挤压模具的工作寿命	246
第十三章 挤压工艺规程编制	253
第一节 挤压工艺规程编制的内容和 步骤	253
第二节 典型零件的挤压工艺规程编制	256
参考文献	265

概 论

挤压就是把金属毛坯放在挤压模腔中，在一定温度下，通过压力机上固定的凸模向毛坯施加压力，使金属毛坯产生塑性变形而制得零件的加工方法。其中以在常温下的冷挤压应用最为广泛。

一、挤压基本类型

挤压是金属零件少/无切屑加工方法之一，它广泛应用于生产的各个部门。根据挤压过程中金属流向与凸模运动方向的关系，可将挤压分为以下几种类型。

① 正挤压 金属的流动方向与凸模运动方向相同。图 0-1(a) 所示为实心件正挤压，图 0-1(b) 所示为空心件正挤压。挤压件的断面形状既可以是圆形也可以是非圆形。

② 反挤压 金属的流动方向与凸模运动方向相反。图 0-1(c) 所示为反挤压的形式之一。反挤压法适用于制造断面是圆形、矩形、“山”形、多层圆形、多格盒形的空心件等。

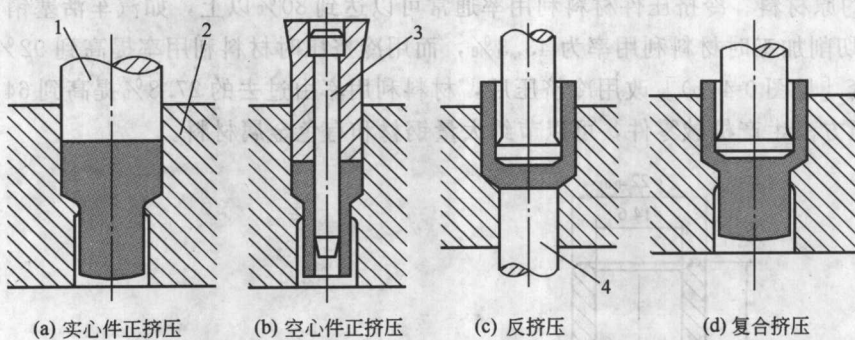


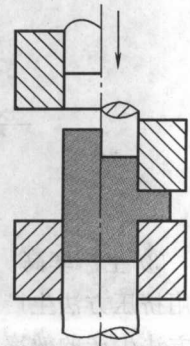
图 0-1 挤压的基本工艺类型

1—凸模；2—凹模；3—芯棒；4—顶杆

③ 复合挤压 金属在凸模运动的同方向和反方向均流动，是正挤和反挤的复合。图 0-1(d) 所示为复合挤压的一种形式。复合挤压法适用于制造断面是圆形、方形、六角形、齿形等的双杯类、杯-杆类或杆-杆类挤压件。

④ 径向挤压 挤压时金属的流动方向与凸模的运动方向垂直，如图 0-2 所示。金属在凸模作用下沿径向流动，用于制造某些需在径向有突起部分的工件，以盘状和饼状零件为最多。

⑤ 减径挤压 是一种变形程度较小的变态正挤压法，毛坯断面仅作轻度缩减，如图 0-3 所示。该挤压方法主要用于制造直径差不大的阶梯轴类挤压件，以及作为深孔薄壁杯形件的修整工序。减径挤压力低于坯料的屈服力，坯料不会产生墩粗，因此其模具可以是开式的，因此减径挤压也叫“开式挤压”或“无约束正挤压”。它特别适合于长轴类件的挤压，是加工带有多台阶轴的有效方法。



正挤压、反挤压与复合挤压是挤压技术中应用最广泛的三种方法。图 0-2 径向挤压

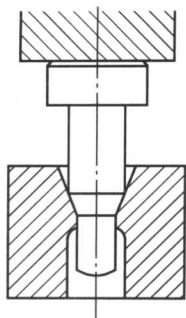


图 0-3 减径挤压

它们的金属流动方向与凸模的轴线平行，有不少资料上又称这三种方法为轴向挤压。轴向挤压可以制得各种实心 and 空心零件，如球头销、梭心壳、弹壳等。径向挤压是最近二十几年来才发展起来的，主要用于通讯器材的号码盘、自行车的花键盘等。

以上是几种基本的挤压变形方式，随着挤压技术的发展，有时还将冷体积模锻等归属为挤压。

挤压工艺在汽车、拖拉机、轴承、电讯器材、仪表等机电制造中已经得到广泛应用，尤其是在家电、轻工以及国防工业系统中应用更为广泛。随着工业技术的发展和人们对产品质量要求的提高，对于一些铸造材质和难以成形的金属采用冷挤或等温挤压越来越广。

二、挤压技术的特点

① 挤压零件尺寸准确，表面光洁。目前我国研制的冷挤压件一般尺寸精度可达 IT8~IT9 级，粗糙度一般可达 $R_a 3.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ，若采用理想的润滑可达 $R_a 0.4 \sim 0.2 \mu\text{m}$ （指纯铝和紫铜零件），仅次于精抛光表面。因此用冷挤压方法制造的零件，一般不需要再加工，少量的只需精加工（磨削）。

② 节约原材料。冷挤压件材料利用率通常可以达到 80% 以上，如汽车活塞销 [见图 0-4(a)] 采用切削加工时材料利用率为 43.3%，而用冷挤压时材料利用率提高到 92%；又如万向节轴承套 [见图 0-4(b)] 改用冷挤压后，材料利用率由过去的 27.8% 提高到 64%。可见，采用冷挤压方法生产机械零件，可以节约大量钢材和有色金属材料。

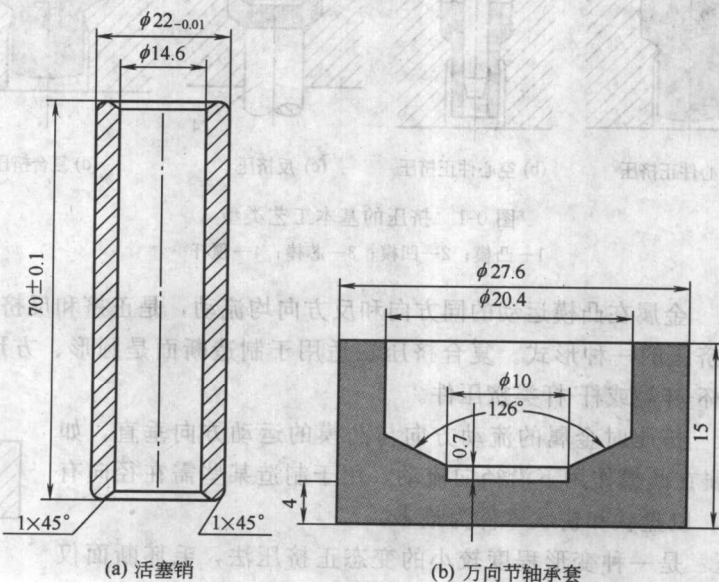


图 0-4 用冷挤制造零件

③ 生产率高。用挤压方法生产机械零件的效率是非常高的，特别是生产批量大的零件时用挤压方法生产可比切削加工提高几倍、几十倍，甚至几百倍。例如，汽车活塞销用冷挤压方法生产的效率比用切削加工制造提高 3.2 倍，目前又用冷挤压活塞销自动机，使生产率进一步提高。一台冷挤压自动机的生产率相当于 100 台普通车床或 10 台四轴自动车床的生

产率。

④ 可加工形状复杂的零件。如异形截面、内齿、异形孔及盲孔等，这些零件采用其他加工方法难以完成，用冷挤压加工却十分方便。

⑤ 冷挤压件强度高、刚性好而质量轻。由于冷挤压采用金属材料冷变形的冷作强化特性，即挤压过程中金属毛坯处于三向压应力状态，变形后材料组织致密，且具有连续的纤维流向，因而制件的强度有较大提高，这样就可用低强度材料代替高强度材料。例如过去采用 20Cr 钢经切削加工制造活塞销，现改用 20 钢经冷挤压制造，经性能测定各项指标，冷挤压法高于切削加工法制造的活塞销。这表明用冷挤压加工活塞销可用 20 钢代替 20Cr 钢。

⑥ 扩大了材料塑性加工成形范围。由于挤压工艺是三向受压应力状态，提高了成形材料的塑性。因此难成形的脆性材质如钛合金、铸造铜合金等都能采用挤压方法成功获得形状复杂的制件。

从以上特点可以看出，冷挤压技术与目前各种加工方法比较，具有突出的优越性。这就为冷挤压代替切削加工、锻造、铸造和拉深工艺来制造机器零件开辟了一条广阔的道路。

三、挤压技术的发展

挤压技术发展的初期是非常缓慢的，在很长一段时期内只对几种软金属（铅和锡）进行挤压。直到 19 纪末 20 世纪初，才开始挤压较硬的有色金属（锌、铝、紫铜、黄铜等）。至于钢的挤压，由于冷挤压时需要很大的压力，在当时不能解决挤压钢用的模具材料、合适的润滑剂与大吨位的压力机等问题，长时间一直认为挤压钢是十分困难甚至是不可能的。

1906 年，英国人科斯利特（T. W. Coslett）发现用磷酸盐处理钢件制品是一种较理想的防锈方法，但工序繁多，且经济效益又差，故未被广泛采用。不过，这种防锈法的出现却极大地激发了人们去研究更简单有效的新方法的积极性。到后来，用自动连续装置对钢毛坯进行磷酸锌防锈处理只需要 2min。经磷酸锌处理过的毛坯表面附有脂肪润滑剂或钠皂薄膜，且这层薄膜不易脱落，挤压这种毛坯时，压力较小。这个发现使人们找到了一种理想的钢毛坯表面处理法——磷化皂化法。

磷化皂化处理钢毛坯表面方法的出现使钢的挤压成为可能。1934 年，德国人采用磷化皂化法成功地冷挤出钢管。第二次世界大战期间，德国人需要大量弹壳，当时黄铜又供应不足，于是德国人秘密试验用冷挤压生产钢弹壳。后来，采用合金工具钢做模具材料，用冷挤压成功地挤出大批量钢弹壳类零件。

第二次世界大战之后，美国人窃取了德国人关于钢的冷挤压的全部资料，开始在美国用冷挤压秘密生产军火，开办了很多生产钢弹壳和弹体的军工厂。

钢的冷挤压于 1947 年才正式用于民用工业。

美国于 1949 年发表了各种钢材冷挤压后力学性能的实验数据。德国于 1950 年、1953 年先后公布了钢的冷挤压的基本技术数据及冷挤压力和挤压功的实验结果。

1957 年，日本引进了专用冷挤压机，开始在精密仪器和仪表中采用冷挤压技术。日本看到这种新技术经济效益显著，很快把这种技术用于制造汽车和电气制件，现已成为遍及各个工业部门的重要加工手段。

在我国，建国前的冷挤压加工是十分落后的，当时，仅有少数工厂用铅、锡等有色金属挤压牙膏管或线材、管材一类产品。

建国后，冷挤压技术得到了发展。20 世纪 50 年代开始了铝、铜及其合金的冷挤压；60

年代黑色金属冷挤压已应用于生产。改革开放以后，冷挤压技术得到了迅速发展。近几年来，随着改革开放和国家工业生产及科学技术的蓬勃发展，冷挤压技术也得到了迅猛发展。

20世纪70年代末，国内不少高等学校、研究所和工厂开展了冷挤压技术的实验研究，发表了大量有价值的论文，初步形成了一支研究和应用冷挤压技术的队伍。

目前，我国已能对铅、锡、铝、铜、锌及其合金、低碳钢、中碳钢、工具钢、低合金钢与不锈钢等金属进行冷挤压，甚至对轴承钢、高碳高铬合金工具钢、高速钢等也可以进行一定变形量的冷挤压。制造的冷挤压件是各种各样的，最重可达30kg，最轻只有1g。在模具材料使用方面，除了用高速钢、轴承钢、高碳高铬合金工具钢外，还采用了不少新型模具钢如CG2、65Nb、LD等。在挤压工艺参数选择和模具结构设计方面，初步采用了优化设计及计算机辅助设计与制造（即CAD/CAM），使模具结构更合理、挤压工艺参数更接近于实际。在挤压设备方面，我国已具备设计和制造各级吨位挤压压力机的能力。除采用通用机械压力机、液压机、冷挤压力机外，还成功地采用摩擦压力机与高速高能设备进行冷挤压生产。

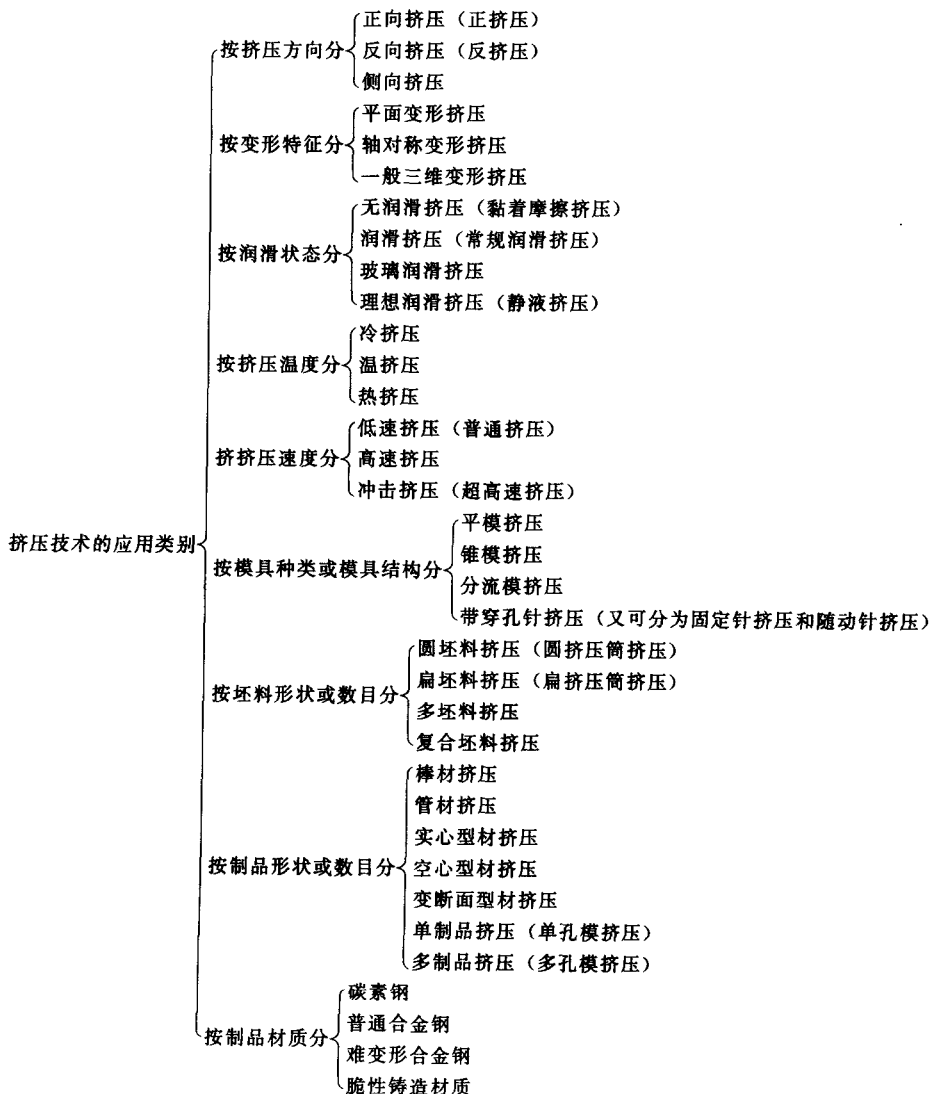


图 0-5 挤压技术的应用类别

由于工业生产的需要及挤压技术的发展,目前该工艺应用愈来愈广。图 0-5 所示为目前挤压工艺的主要应用类别。

科学技术的发展对挤压技术产生了重大影响,具体地说主要是计算机在工艺分析、模具设计、制造及工艺过程控制中的应用对冷挤压技术产生的影响。我国将进一步发展应用这门新技术。发展挤压技术主要应从以下几方面着手:

- ① 扩大挤压技术的应用范围,在一定范围内,逐步代替铸、锻、拉深及切削加工;
- ② 提高挤压制件的精度和表面质量,生产出几何形状更复杂的制件;
- ③ 扩大挤压用的原材料种类,研究更理想的表面处理与润滑方法;
- ④ 进一步使用 CAD/CAM 和优化设计,改进模具设计与制造手段,研制出更合理的模具结构;
- ⑤ 寻找更适合于挤压用的模具材料及其热处理方法,以延长模具的使用寿命;
- ⑥ 进一步发展温热挤压、等温挤压、静液挤压及高速挤压等新工艺技术的研究和应用;
- ⑦ 研制适合于挤压工艺的多功能的挤压设备,使毛坯和制件能安全自动地进料与出件,以便进一步提高生产率。

第一章 挤压的基本原理

挤压是利用金属的塑性变形，把金属毛坯放进凹模内，通过凸模给金属坯料施加压力，使坯料产生塑性变形而制得零件的方法（见图 1-1）。

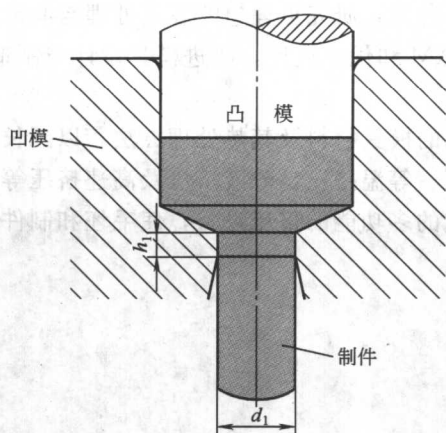


图 1-1 挤压示意

第一节 挤压的变形过程

挤压变形过程可分为四个阶段，即充满型腔阶段、开始挤出阶段、稳定挤压阶段和挤压完毕阶段。下面分别介绍实心件正挤压、杯形件反挤压和杯-杆件复合挤压的变形过程。

一、实心件正挤压

毛坯自由放入凹模型腔内（毛坯与模壁间有 0.05~0.10mm 的间隙），凸模给坯料加压，坯料径向流动而充满模腔 [见图 1-2(b)]。

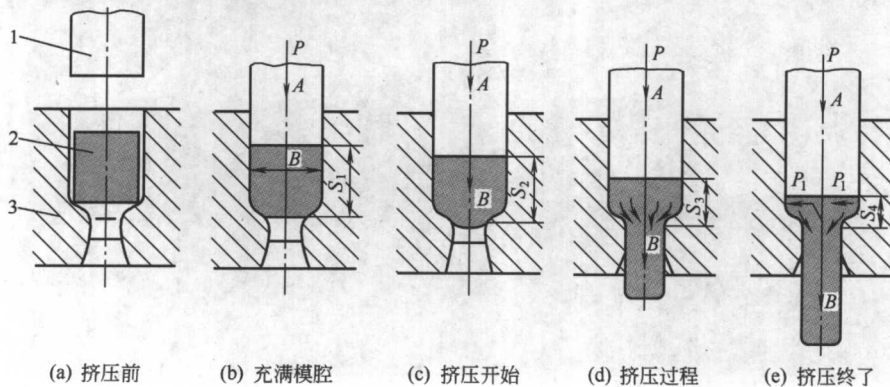


图 1-2 实心件正挤压变形过程

1—凸模；2—毛坯；3—凹模

凸模继续下压，毛坯被挤至凹模孔口 [见图 1-2(c)]，变形区域逐渐扩大，挤到凹模入口处的金属坯料开始进入模孔。

当凸模再向下时，变形区高度逐渐减小 [见图 1-2(d)]，金属从模孔中连续挤出，挤压工作稳定进行。

挤压进行到最后阶段，毛坯高度进一步减小，变形遍及凸模下端面相连的整体，即变形区域扩大到整个毛坯 [见图 1-2(e)]。

二、杯形件反挤压

图 1-3 所示为反挤压的变形过程。在凸模作用下，金属毛坯墩粗充满凹模模腔 [见图 1-3(b)]；凸模继续压下，金属挤入凸、凹模间的环形间隙 t 里 [见图 1-3(c)]，开始向上流动；凸模持续下压时，金属毛坯上端部分的金属沿着凸凹模间隙不断向上流动 [见图 1-3(d)]；凸模进一步下压到底厚为 S_1 时 [见图 1-3(e)]，反挤过程完成，获得所需制件。

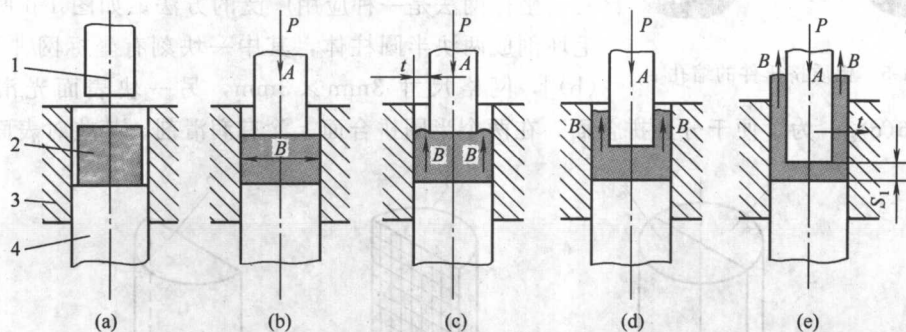


图 1-3 杯形件反挤压变形过程

1—凸模；2—毛坯；3—凹模；4—顶杆

三、杯-杆件复合挤压

复合挤压时的变形过程如图 1-4 所示。第一阶段，毛坯在凸模的作用下充满模腔 [见图 1-4(b)]。第二阶段，在凸模下压时，变形金属同时进入凸、凹模之间的间隙及凹模孔口，开始双向流动 [见图 1-4(c)]。第三阶段，当凸模继续下压时，金属沿上、下两个方向，平稳、自由地流动 [见图 1-4(d)]。最后阶段，凸模下压到金属残留厚度为 S_1 时 [见图 1-4(e)]，复合挤压工作结束。

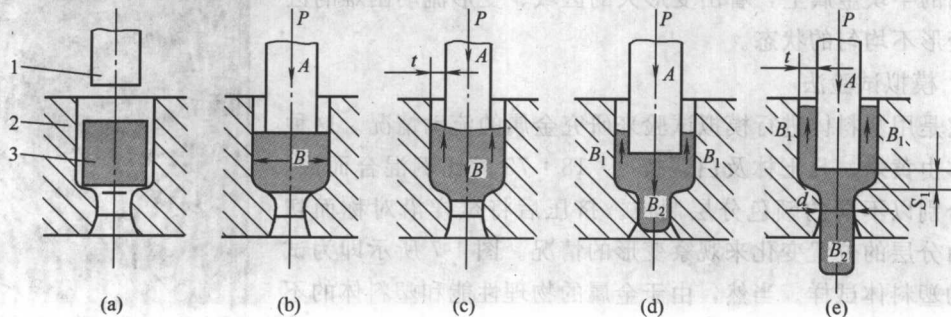


图 1-4 杯-杆件复合挤压变形过程

1—凸模；2—凹模；3—毛坯

第二节 挤压变形时的应力与应变

一、挤压变形时金属的流动

实际生产发现正挤压铝质零件端部会出现很深的缩孔（见图 1-5），缩孔是挤压产品质量问题之一，从提高产品质量出发，应分析这些事实，找出防止和消除的办法。为此，我们应对冷挤压时金属的流动进行研究。

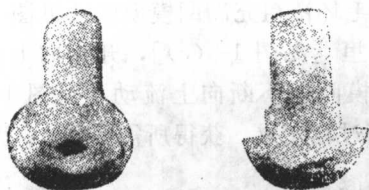
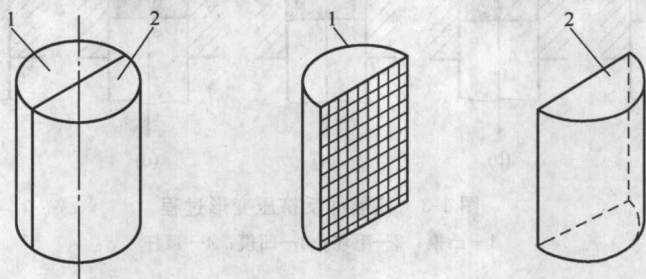


图 1-5 铝质挤压件的缩孔

研究金属变形和应力的方法很多，目前应用的方法有坐标网法、模拟实验法、硬度实验法、光塑性法和密栅云纹法。下面介绍这些方法。

1. 坐标网法

坐标网法是一种应用广泛的方法。如图 1-6 所示，把毛坯剖成两块半圆柱体，其中一块刻有坐标网 [见图 1-6 (b)]，另一块表面光滑、平整 [见图 1-6(c)]。为了便于分开拼合面，在两个半圆拼合面上涂有润滑剂。某些对表面刻痕敏



(a) 粘合在一起的毛坯(1,2)

(b) 剖切面上刻有坐标网的半块毛坯

(c) 剖切面光滑的半块毛坯

图 1-6 毛坯上刻的坐标网

感的材料，最好把试样表面抛光，涂上感光膜，再覆上正确的坐标网底片，经感光、冲洗后，得到精细的坐标网。然后把两个半圆柱 [见图 1-6(a)] 放入凹模中挤压，可以从挤压后刻有坐标网的半块金属上，看出变形大的区域、变形流动困难的区域及变形不均匀的状态。

2. 模拟试验法

它是用塑料体进行模拟试验来研究金属的流动情况。这种塑料体由黄蜡、凡士林及白垩按 9 : 18 : 73 的比例混合而成。试样分别以不同的颜色分层制成。挤压后将试样沿对称而切开，由分层的位置变化来观察变形的情况。图 1-7 所示即为试验后的塑料体试样。当然，由于金属的物理性能和塑料体的不一样，对塑料体进行挤压的结果与金属挤压时的流动情况不能完全相同，因此这种方法仅能用作模拟试验。

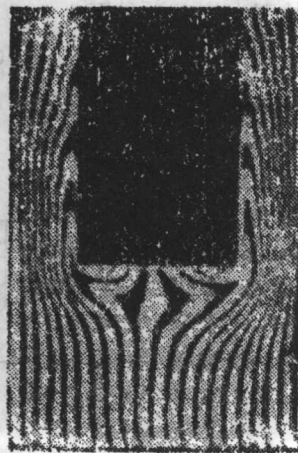


图 1-7 塑料体挤压流动

3. 硬度试验法

在冷变形时，金属的硬度是随变形程度的增加而增加的，所以只要知道变形各部分硬度的变化，就可以大体上了解变形的数值以及变形不均匀分布的情况。图 1-8 所示为钢零件用不同方法冷挤压后各部分硬度变化的情况。

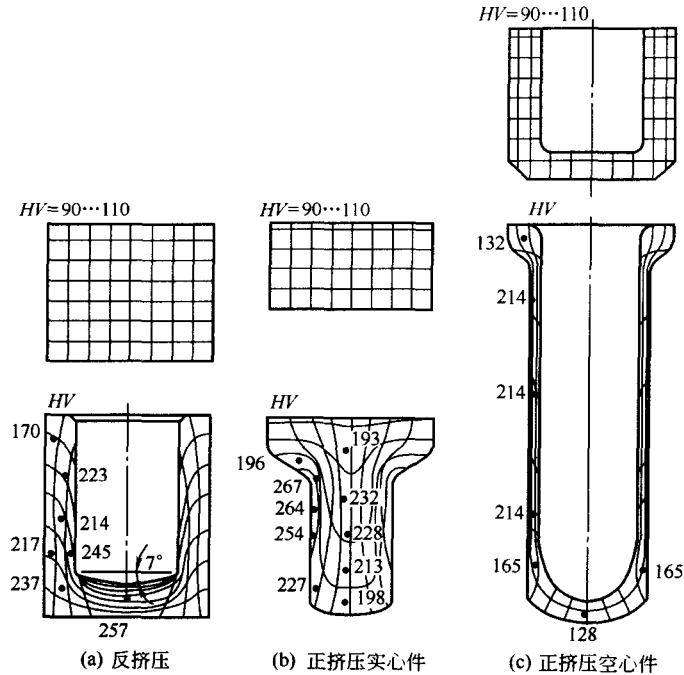


图 1-8 用硬度试验法研究钢零件的变形分布

4. 光塑性法

目前研究塑性变形体内应力分布情况的主要方法是光学分析法。它利用偏振光（或称偏振光）透过各向同性的变形试样以产生各种彩色的线条，借以观察试样内应力的分布情况。光塑性法基本上和实验应力的光弹性法一样，不过光塑性所用的材料，除了须符合一般光弹性测量的要求外，还要能适用于塑性变形试验，这就要求具有好的透明度、光学性能以及在力学性能上的各向同性和易于机械加工，同时要在温度变化不大时光学性能和力学性能稳定，能有较大的塑性变形。常用的材料有赛璐珞、树胶、松脂酸等。

5. 密栅云纹法

密栅云纹法是利用已制好的高精度的密栅板，用照相拷贝等方法翻印在胶片上制成密栅片，将此胶片粘贴在试样上作为试件栅，另外翻印在玻璃片上作为基准栅。云纹试验也可以在金属材料上进行（用化学腐蚀或光栅在材料上刻出云纹），也可以用其他材料制作模型进行试验，然后再按相似理论推算出实物上的应力与应变。

二、挤压变形时的应力与应变

凸模作用在金属材料上给坯料以压制，凹模阻止金属坯料向四周流动，也给金属坯料一个压力。毛坯在凸模的作用下只有向凹模孔口流出 [见图 1-9(a) 正挤压]，或沿凸、凹模之间的间隙流动 [见图 1-9(b) 反挤压]。此外，由于金属流动与凹模有相对运动，产生了阻

止金属流动的摩擦力。在这种情况下，金属要从凹模孔口或沿凸、凹模间隙流动，凸模势必施加更大的压力，以克服摩擦力和金属变形抗力。

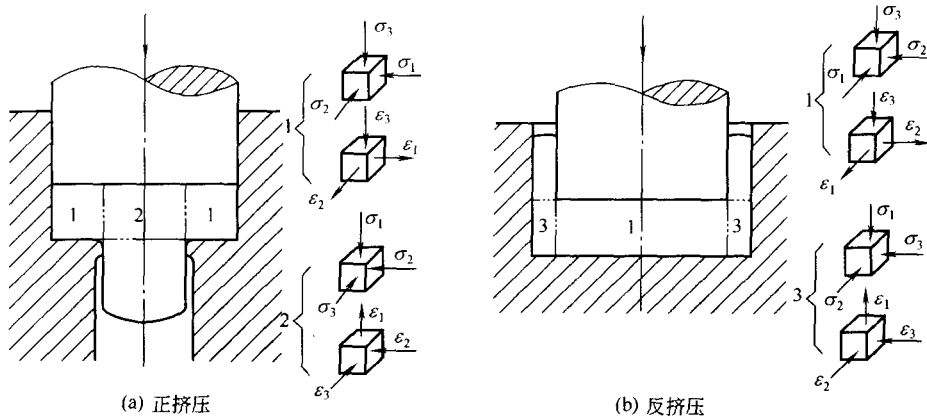


图 1-9 挤压变形时金属的应力与应变

挤压时，变形区内任意一点的应力状态和应变状态，都可用主应力图和主应变图来表示。由以上分析可知，挤压变形区内的基本应力状态皆为三向压应力，但在变形区的不同区域，应力和应变的顺序是不同的。下面分区进行研究。

对于实心件正挤压和杯形件反挤压，假定摩擦很小，毛坯高径比较小，根据变形力学可以把变形区分为两个截然不同的区域，如图 1-9 所示。

实心件正挤压时 [见图 1-9(a)]，区域 1 是直接受压缩区，它的变形和环形毛坯在封闭模腔中镦粗相似，受三向不等的压应力，应变为两向压应变一向拉应变。而区域 2 的变形却与用子午线圆轴相似，仍受三向压应力，轴向为拉应变，切向、径向为压应变。

杯形件反挤压时 [见图 1-9(b)]，区域 1 是直接受压缩区，与圆形毛坯在两平板间镦粗相似，受三向不等的压应力，应变为两向拉应变一向压应变。区域 3 是间接受压缩区，它受三向压应力，应变为两向压应变一向拉应变。

这样的应力与应变状态有利于提高金属的力学性能，降低由于材料内部缺陷引起的破坏。此外可用低塑性、低强度金属代替高强度金属。

第三节 挤压时金属的流动

前面已经介绍过研究金属变形和应力的几种方法，从这些方法中可以看出，最简单而有效的方法是坐标网法。下面介绍用坐标网法研究冷挤压时金属的流动。

一、空心件正挤压时的金属流动

如图 1-10 所示，金属毛坯在挤压时受凸模作用的挤压力、凹模作用的正压力和凸、凹模壁阻止金属流动的摩擦力。金属毛坯受三向压应力（径向压应力 σ_r 、切向压应力 σ_t 和轴向压应力 σ_z ）。由于挤压是轴对称的（ $\sigma_r = \sigma_t$ ，应变 $\epsilon_r = \epsilon_t$ ），故挤压时的变形是两向压缩应变，一向拉应变。图 1-10(b) 所示为正挤压空心件时坐标网的变化情况。根据坐标网的变化，可以看出金属在挤压时的流动有以下特点。

① 大部分坐标网在挤压后发生了很大的弯曲，且变形极不均匀。挤出部分的横向（与

轴线垂直的方向)坐标网线弯曲最大,中心部分金属变形超前于外层金属变形(摩擦的影响)。

② 挤出端部,横向坐标网线弯曲不大,该部分金属正挤压空心件时的流动变形不大,这是由于它原来就在凹模出口附近,挤压开始不久就能迅速、自由地向外挤出。

二、杯形件反挤压时的金属流动

用实心毛坯反挤杯形件时,各阶段的流动情况如图 1-11 所示。当凸模下压进入毛坯时,与凸模接触的上端面变形很小[见图 1-11(b)],与金属毛坯锻造相似,是变形困难区(由于摩擦的影响),毛坯的下端面受凹模摩擦的影响,变形也极小,也是难变形区。在上下难变形区之间的凸模与凹模间隙处,有一个变形剧烈区,金属向外、向上急剧流动。杯形件主要依靠这部分金属流动成形,反挤压时剧烈变形区在轴向高度为 $0.1 \sim 0.2d$ (d 为凸模工作部分直径)。从反挤压变形过程的坐标网格的变化情况[见图 1-11(c)]可以看出,反挤压时坯料各部分的变形是极不均匀的。变形最大处在零件内表面,外表面变形小,毛坯底部开始变形小,挤压继续进行到底部时,变形才逐渐增大。此外,挤出杯形件的壁部不再变形,只向上作刚性平移。

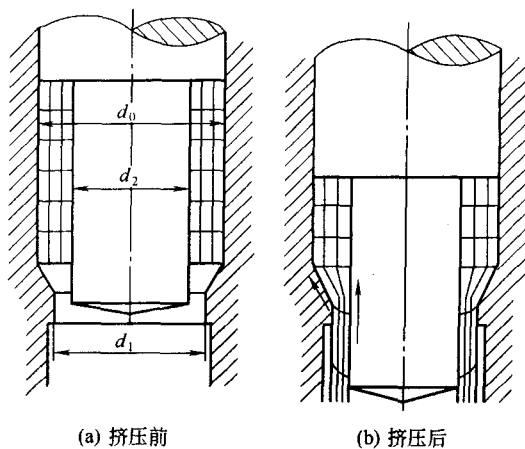


图 1-10' 实心件正挤压时的金属流动

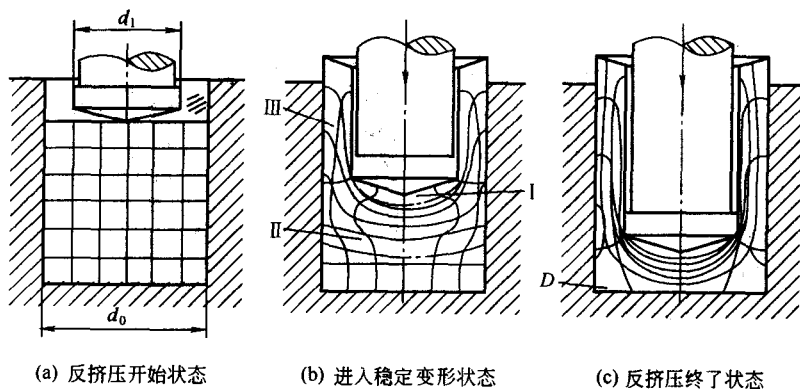


图 1-11 杯形件反挤压时的金属流动

三、杯-杆件复合挤压时的金属流动

杯-杆件复合挤压时的金属流动,是单独正挤和反挤时金属流动的情况的综合(见图 1-12),它相当于反挤杯形件(上部)与正挤杆形件(下部)的结合。金属上部的流动情况与图 1-11 所示相同,下部的流动情况则与正挤压时一致。此外还看到,压制厚度减小,凸模下面进入变形区域愈小,制动区减小,圆弧形变形区以下,则反映出实心件正挤压时金属的流动特性,挤压时金属质点流经距离的差异及外摩擦的影响,显然中心流得快,横向网线向下弯曲,其间距也在不断变化。

挤压时,影响金属流动的主要因素有金属材料性质、变形条件、变形速度与变形温度。